
ÍNDICE

<i>AGRADECIMIENTOS</i>	5
<i>RESUMEN</i>	7
<i>ABSTRACT</i>	9
<i>RESUM</i>	11
<i>ÍNDICE</i>	13
<i>ACRÓNIMOS</i>	21
<i>NOTACIÓN</i>	23
<i>ÍNDICE DE FIGURAS</i>	27
<i>ÍNDICE DE TABLAS</i>	31
<i>Capítulo 1: INTRODUCCIÓN</i>	33
1.1 La optimización en la ingeniería estructural.....	33
1.2 El cálculo de estructuras y el problema de la optimización estructural.....	34
1.3 Los estribos abiertos. El estribo de referencia a optimizar	34
1.4 El diseño tradicional de estructuras	40
1.5 La potencia de cálculo de los ordenadores personales y los métodos exactos	41
1.6 De la complejidad matemática a la solución aproximada, la variable discreta y las técnicas heurísticas	41
1.7 El diseño automatizado y su optimización	43
1.8 La optimización mediante técnicas heurísticas.....	44
1.8.1 Clasificación de las técnicas: heurísticas y metaheurísticas.....	44
1.8.2 Búsqueda aleatoria (<i>random walk</i> o método de Monte Carlo).....	45
1.8.3 Movimiento y entorno. Búsqueda por gradiente o en descenso (<i>descent local search</i>)	46
1.8.4 Búsqueda secuencial por entornos (o métodos <i>hill-climbing</i> o de escalada estocástica).....	47
1.8.4.1 <i>Cristalización simulada (Simulated Annealing, SA)</i>	47
1.8.4.2 <i>Búsqueda Tabú (Tabú Search, TS)</i>	48
1.8.4.3 <i>Búsqueda local iterada (Iterated Local Search, ILS)</i>	48
1.8.4.4 <i>Aceptación por umbrales (Threshold Accepting, TA)</i>	49
1.8.4.5 <i>Búsqueda en entornos variables (Variable Neighbourhood Search, VNS)</i>	49

1.8.5	Algoritmos evolutivos (o algoritmos con poblaciones de soluciones o poblacionales)	49
1.8.5.1	Algoritmos genéticos (<i>Genetic Algorithms, GA</i>)	50
1.8.5.2	Algoritmos meméticos (<i>Memetic algorithm, MA</i>)	50
1.8.5.3	Colonia de Hormigas (<i>Ant Colony Optimization, ACO</i>)	51
1.8.6	Redes neuronales	51
1.9	Objetivos de la tesis y metodología	52
1.9.1	Objetivos principales	52
1.9.2	Objetivos secundarios o metodológicos.....	53
1.9.3	Objetivos complementarios a los principales	54
1.10	Estructura de la tesis	54
1.11	Recursos computacionales necesarios	57
<i>Capítulo 2: ESTADO DEL ARTE</i>		59
2.1	La optimización de estructuras hasta los años 80: los métodos exactos.	59
2.2	Desde los años 80 hasta los 90, la optimización aproximada: las metaheurísticas.	60
2.3	La aplicación de las metaheurísticas a las estructuras de hormigón armado: una década desde finales de los años 90.	61
2.3.1	GA: Algoritmos genéticos (10 investigaciones).....	62
2.3.1.1	Viga rectangular biapoyada	62
2.3.1.2	Pilares de hormigón sometidos a flexocompresión esviada.....	62
2.3.1.3	Pórticos planos de edificación (tres investigaciones)	62
2.3.1.4	Depósitos rectangulares	63
2.3.1.5	Losas de hormigón armado cuadrada apoyada en dos bordes sometida a un impacto usando elementos finitos dinámicos no lineales.....	63
2.3.1.6	Vigas continuas con canto variable	64
2.3.1.7	Pantallas (muros) de arriostramiento horizontal de edificios	64
2.3.1.8	Depósitos cónicos de contención de agua	64
2.3.2	SA: Cristalización simulada (4 investigaciones).....	64
2.3.2.1	Pórticos de edificación tridimensionales.....	64
2.3.2.2	Muros ménsula de contención de tierras.....	65
2.3.2.3	Viga continua.....	65
2.3.2.4	Depósitos cónicos de contención de agua	65

2.4	Irrupción del grupo de investigación GPRC de la UPV, un lustro desde 2005: Estructuras de hormigón armado completamente definidas. SA, TA y otras	66
2.4.1.1	Muros ménsula de contención de tierras.....	68
2.4.1.2	Pórticos de carretera	68
2.4.1.3	Marcos de carretera.....	68
2.4.1.4	Bóvedas de carretera	68
2.4.1.5	Pórticos de edificación.....	69
2.4.1.6	Pilas rectangulares huecas en viaductos de carretera y ferrocarril de alta velocidad.....	69
2.4.1.7	Estructuras pretensadas: tableros de puente y forjados insitu postesados.....	70
2.4.1.8	Investigaciones en otras áreas de la ingeniería	70
2.5	Nuevas Metaheurísticas	70
2.6	La Hibridación de Metaheurísticas.....	72
2.7	El Impacto ambiental. El diseño sostenible.	75
2.8	La optimización multicriterio o multiobjetivo.....	77
2.9	El hormigón pretensado y el diseño y la optimización de puentes y sus estribos. Los nuevos hormigones.....	79
2.10	Síntesis del estado del arte.....	83
<i>Capítulo 3: DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN: EL ESTRIBO ABIERTO Y LA FUNCIÓN OBJETIVO COSTE.....</i>		
3.1	La definición del problema matemático de optimización	89
3.2	El problema de optimización del estribo abierto	91
3.3	Variables y parámetros	92
3.3.1	Geométricos.....	92
3.3.2	De armado	94
3.3.3	De materiales.....	96
3.3.4	Parámetros de cargas (11 valores) y parámetros de acciones (8 valores).....	98
3.4	Función objetivo. Coste	100
3.4.1	Precios unitarios.....	100
3.4.2	Mediciones	101
3.4.3	Coste del estribo de referencia	101
<i>Capítulo 4: COMPROBACIÓN DEL ESTRIBO ABIERTO.....</i>		
		103

4.1	Normativa	103
4.2	Acciones consideradas	103
4.3	Modelo de cálculo de esfuerzos	106
4.3.1	Cabezal y fustes.....	106
4.3.2	Zapata.....	107
4.4	Combinaciones de acciones y envolventes.....	109
4.4.1	ELU	110
4.4.2	ELS	110
4.4.3	Combinaciones en cabezal y fustes.....	112
4.4.4	Combinaciones en zapata.....	113
4.4.5	Envolventes.....	114
4.5	Comprobaciones.....	114
<i>Capítulo 5: HEURÍSTICAS SENCILLAS. EL ESPACIO DE SOLUCIONES (FACTIBLES).....</i>		<i>119</i>
5.1	Enfoque del capítulo	119
5.2	Random Walk (RW: Búsqueda Aleatoria o Método de Monte Carlo).....	120
5.2.1	Descripción del método.....	120
5.2.2	Ventajas e inconvenientes	120
5.2.3	Aplicación 1: EL espacio de soluciones factibles.....	120
5.2.3.1	<i>Descripción y objeto</i>	<i>120</i>
5.2.3.2	<i>Resultados y análisis.....</i>	<i>121</i>
5.2.4	Aplicación 2: RW como método de optimización	124
5.2.4.1	<i>Descripción y objeto</i>	<i>124</i>
5.2.4.2	<i>Resultados y análisis.....</i>	<i>126</i>
5.3	Descent local search (DLS: búsqueda por gradiente o descenso).....	128
5.3.1	Descripción del método.....	128
5.3.2	Abandono anticipado en la evaluación de soluciones excesivamente costosas	129
5.3.3	Ventajas e inconvenientes	129
5.3.4	El movimiento.....	129
5.3.5	Problemática en la elección del movimiento.....	130
5.3.6	Criterio de parada	130
5.3.7	Aplicación 1: Calibración del DLS.....	131
5.3.7.1	<i>Descripción y objeto</i>	<i>131</i>
5.3.7.2	<i>Resultados y análisis.....</i>	<i>133</i>
5.3.8	Aplicación 2: DLS con MULTIARRANQUES (REINICIOS).....	137

5.3.8.1	<i>Descripción y objeto</i>	137
5.3.8.2	<i>Resultados y análisis</i>	138
<i>Capítulo 6: METAHEURÍSTICAS HILL CLIMBING CON SOLUCIONES FACTIBLES</i>		143
6.1	Simulated Annealing (SA).....	143
6.1.1	El fenómeno físico de la cristalización o “recocido”	143
6.1.2	El modelo de Metrópolis para simular el fenómeno	143
6.1.3	La aplicación del modelo de Metrópolis como método general de optimización	144
6.1.4	Descripción del método.....	145
6.1.5	Elección del movimiento adecuado.....	147
6.1.6	Generalización del criterio de abandono de soluciones excesivamente costosas para SA (TA)	147
6.1.7	Selección de la temperatura inicial	148
6.1.8	Longitud de cadena de Markov	149
6.1.9	Ritmo de enfriamiento	149
6.1.10	Selección del criterio de parada.....	150
6.1.11	Aplicación 1: Calibración SAMO	151
6.1.11.1	<i>Descripción y objeto</i>	151
6.1.11.2	<i>Resultados y análisis</i>	153
6.1.11.3	<i>Estrategias de mejora</i>	158
6.1.12	Aplicación 2: SAMO con RECALENTAMIENTOS	159
6.1.12.1	<i>Descripción y objeto</i>	159
6.1.12.2	<i>Resultados y análisis</i>	161
6.2	Threshold Accepting (TA)	162
6.2.1	Fundamento	162
6.2.2	Descripción del método.....	163
6.2.3	Aplicación 1: Calibración TAMO.....	165
6.2.3.1	<i>Descripción y objeto</i>	165
6.2.3.2	<i>Resultados y análisis</i>	167
6.2.3.3	<i>Estrategias de mejora</i>	173
6.2.4	Experimento 2: TAMO con RECALENTAMIENTOS	174
6.2.4.1	<i>Descripción y objeto</i>	174
6.2.4.2	<i>Resultados y análisis</i>	176
6.3	Comparación de los métodos RW/ DLS/ SA/ TA.....	177
6.4	Aplicación de estrategias de mejora: los óptimos globales	182

<i>Capítulo 7: METAHEURÍSTICAS HILL CLIMBING INCLUYENDO SOLUCIONES</i>	
<i>INFECTIBLES</i>	185
7.1 Soluciones Infactibles. Fundamento	185
7.2 Las penalizaciones	185
7.3 Nueva función objetivo penalizada: sobrecostes e incumplimientos	186
7.4 Nuevo pautado de la penalización	188
7.5 Aplicación numérica: SA con Penalizaciones (SAP)	190
7.5.1 Descripción y objeto.....	190
7.5.2 Casos en función del valor de las penalizaciones	190
7.5.3 Generalización para SAP del criterio de abandono anticipado en la evaluación de soluciones excesivamente costosas de SA	192
7.5.4 Resultados y análisis. Comparación SAP con SA	194
<i>Capítulo 8: METAHEURÍSTICAS POBLACIONALES</i>	195
8.1 Introducción. Metaheurística Harmony Search (HS)	195
8.2 Descripción del algoritmo HS.....	196
8.3 Aplicaciones numéricas con soluciones factibles	198
8.3.1 HS: calibración del algoritmo	198
8.3.1.1 Descripción y objeto	198
8.3.1.2 Resultados y análisis.....	198
8.3.2 HS con DLS (HSDLS) sin reordenar.....	200
8.3.3 HS con DLS (HSDLS) y con reordenar.....	200
8.4 Aplicaciones numéricas con soluciones infactibles	201
8.4.1 HS con DLS con y sin reordenar y Penalizaciones (HSPDLS).....	201
8.5 Análisis final y comparativo HS, HSDLS y HSPDLS con SA y TA	202
<i>Capítulo 9: ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y ECONÓMICO DE LOS ESTRIBOS</i>	
<i>OPTIMIZADOS</i>	205
9.1 Enfoque del capítulo	205
9.2 Estudio paramétrico	206
9.3 Principales magnitudes de los estribos optimizados	206
9.4 Análisis de la geometría.....	210
9.5 Análisis del material	215
9.6 Análisis de las cuantías	215
9.7 Análisis de las comprobaciones críticas y disposiciones de armado.....	216
9.8 Análisis económico	218
<i>Capítulo 10: OPTIMIZACIÓN DE OTRAS FUNCIONES OBJETIVO</i>	221

10.1 Otras funciones y la heurística empleada (SA).....	221
10.2 Sostenibilidad ambiental: Emisiones de CO ₂	222
10.3 Sostenibilidad ambiental: Energía (kW x hora).....	224
10.4 Constructibilidad (Número de barras de acero).....	226
10.5 Seguridad estructural.....	228
10.6 Optimización en coste y valores concomitantes de los otros criterios.....	230
<i>Capítulo 11: OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO</i>	231
11.1 Heurística MOSAMO	231
11.2 Coste .VS. Sostenibilidad ambiental (Emisiones de CO ₂)	233
11.3 Coste .VS. Constructibilidad (Número de barras de acero).....	233
11.4 Coste .VS. Seguridad estructural.....	234
11.5 Coste .VS. Energía de construcción (kW x hora)	236
11.6 Análisis conjunto de la optimización de objetivos aislados y multiobjetivo	236
<i>Capítulo 12: CONCLUSIONES</i>	239
12.1 Objetivos y estructura de las conclusiones.....	239
12.2 Respecto al estado del arte	239
12.3 Respecto el diseño óptimo económico automatizado mediante las técnicas heurísticas	241
12.4 Respecto al conocimiento de la forma óptima resistente	243
12.5 Respecto a la optimización de otras funciones objetivo y la optimización multicriterio	245
12.6 Respecto a futuras líneas de investigación	246
<i>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i>	249
<i>APÉNDICES</i>	267
Apéndice 1. Estribos optimizado .VS. ER: Definición geométrica y armados. Desglose del coste, acero y cuantías. Resultados de las comprobaciones	269
Ap. 1.1. Mejor solución encontrada, coste: 10.132,39 €	271
Ap. 1.2. Solución de referencia (ER), coste: 12.473,95 €	279
Apéndice 2. Listados de cálculo mejor solución encontrada, coste: 10.132,39 €.....	287
Apéndice 3. Rango de variables. Valores máximos, mínimos y pasos	329